



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis para obtener el grado académico de  
Geofísico

# Análisis de los procesos de infiltración y escorrentía durante precipitaciones intensas

**Autor:** Gabriel Ricardo Gelpi

**Director:** Dr. Luis Guarracino

LA PLATA, ARGENTINA  
- MARZO 2015 -

# Resumen

La escorrentía superficial tiene lugar cuando es alcanzada la capacidad máxima de infiltración de agua del suelo. La mayoría de los modelos hidrogeológicos convierten el exceso de infiltración en escorrentía, la cual puede causar inundaciones con importantes pérdidas materiales y humanas. La infiltración se puede estimar a partir de relaciones empíricas o de modelos físicos, y depende de varios factores, entre ellos la conductividad hidráulica del suelo, cobertura superficial y el estado inicial de humedad del terreno.

El objetivo de este trabajo de tesis es modelar la infiltración durante precipitaciones severas resolviendo la ecuación no lineal de Richards con condiciones de borde apropiadas. El modelo numérico implementado en lenguaje FORTRAN se basa en la resolución de la ecuación de Richards utilizando un método mixto de elementos finitos combinado con un método iterativo de Picard modificado para tratar los términos no lineales. Las condiciones de borde propuestas serán tipo Neumann, cuando la precipitación sea menor a la conductividad hidráulica superficial y de tipo Dirichlet cuando se produce el anegamiento superficial de agua. Dado que nos interesa la infiltración durante una precipitación en un terreno llano, la simulación se considera unidimensional y se utilizan mallas densas y regulares para poder describir el frente de saturación durante la precipitación. El contenido volumétrico de agua y la conductividad hidráulica se obtienen a partir del modelo de van Genuchten.

Se analizó la infiltración en diferentes tipos de suelos clasificados según su textura y duración y cantidad de agua precipitada. Los resultados obtenidos con la simulación fueron satisfactoriamente validados con la ecuación de Philip.

Finalmente se estimó la infiltración de la tormenta del 2 de abril de 2013 ocurrida en la ciudad de La Plata. En dicho evento se registraron unos 390 mm de agua en un período relativamente breve, generando una inundación sin precedentes en la ciudad con grandes pérdidas humanas y materiales. La simulación brindó una estimación del agua que pudo haber infiltrado durante el evento y qué porcentaje de agua devino en escorrentía, favoreciendo la inundación.

# Índice general

<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
• Introducción.....	1
• 1.1 Descripción de los contenidos.....	2
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>3</b>
• Modelo conceptual.....	3
• 2.1 Variables del problema.....	3
• 2.2 Ecuación de Richards.....	5
• 2.3 Modelo de van Genuchten.....	6
• 2.4 Condiciones de borde.....	7
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>10</b>
• Modelo numérico.....	10
• 3.1 Modelo diferencial.....	10
• 3.2 Discretización temporal y linealización.....	11
• 3.3 Discretización espacial.....	12
• 3.4 Validación del modelo.....	12
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>15</b>
• Análisis paramétrico.....	16
• 4.1 Cantidad de agua precipitada.....	16
• 4.2 Textura del suelo.....	17
• 4.3 Duración de la tormenta.....	18
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>21</b>
• Aplicación del modelo.....	21
• 5.1 Tormenta del 2 de abril de 2013.....	21
• 5.2 Cálculo y análisis de la infiltración.....	22
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>26</b>
• Conclusiones.....	26

<b>Referencias.....</b>	<b>28</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>30</b>

# Índice de figuras

3.1 Infiltración de un suelo con textura limosa calculada con la ecuación de Philip y el modelo propuesto.....	14
3.2 Infiltración de un suelo con textura margo-arenosa calculada con la ecuación de Philip y el modelo propuesto.....	14
4.1 Régimen de precipitación propuesto para el análisis paramétrico.....	15
4.2 Análisis paramétrico de infiltración en una textura margo arcillo arenosa según intensidad de la lluvia.....	16
4.3 Análisis paramétrico de la infiltración para lluvia constante y diferentes texturas.....	17
4.4 Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en una hora.....	18
4.5 Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en dos horas.....	18
4.6 Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en cuatro horas.....	18
5.1 Lluvia acumulada registrada durante el 02/04/2013 en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP.....	21
5.2 Infiltración calculada y lluvia precipitada durante el 02/04/2013.....	22
5.3 Frentes de saturación del día para la tormenta del 02/04/2013.....	24
5.4 Frentes de saturación de las horas más intensas de la tormenta del 02/04/2013.....	24
5.5 Perfiles de flujo de agua a las 15 hs, 18 hs y 21 hs.....	25



# Capítulo 1

## Introducción

La cuantificación de la infiltración en suelos durante una precipitación juega un papel importante en diversos problemas de la hidrología, como puede ser, el balance hídrico y la evaluación del riesgo de inundación en una región determinada. Una vez que el suelo ha alcanzado su máximo nivel de absorción y retención de agua precipitada tiene lugar la escorrentía superficial. Este proceso puede generar diversos inconvenientes como marcada erosión del suelo, anegamiento superficial e inundaciones con importantes pérdidas materiales y humanas.

El objetivo de este trabajo consiste en modelar los procesos de infiltración y escorrentía superficial que se producen durante precipitaciones intensas. La escorrentía tiene lugar cuando el agua precipitada excede la capacidad de infiltración del suelo. Es por ello que el estudio de la infiltración es clave para el análisis de la escorrentía, magnitud que dependerá de diversos factores como la conductividad hidráulica de los sedimentos que conforman el suelo, el estado de humedad previo a la lluvia y el tipo de cobertura superficial.

Una vez validado el modelo se realizará un análisis paramétrico de la infiltración en función de la textura del suelo e intensidad y duración de la precipitación, y se utilizará el modelo para estimar la infiltración y escorrentía durante la tormenta ocurrida el día 2 de abril de 2013 en la ciudad de La Plata. Como es sabido dicha tormenta dió lugar a una inundación que causó severos problemas a la ciudad.

La mayoría de los modelos hidrológicos existentes transforman el exceso de infiltración en escorrentía superficial (Chahinian et al., 2005). La infiltración puede estimarse utilizando modelos físicos (Haverkamp et al., 1990, Corradini et al., 1994) o mediante relaciones empíricas (Horton, 1933). Estos modelos dependen de un número variable de parámetros que caracterizan las propiedades del suelo y su estado inicial de humedad. En el presente trabajo de tesis se propone desarrollar un modelo físico basado en la resolución de la ecuación no lineal de Richards con condiciones de borde que dependen del estado de humedad cercano a la superficie y de la precipitación. La implementación de las condiciones de borde constituye una parte central del trabajo

y para su implementación se siguieron las ideas presentadas en los trabajos de van Dam y Feddes (2000); Guarracino y Cesanelli (2008).

El modelo numérico se basa en la resolución de la ecuación no lineal de Richards utilizando un método mixto de elementos finitos combinado con un método iterativo de Picard para tratar los términos no lineales (Celia et al., 1990). El dominio de simulación se considerará unidimensional y se utilizarán mallas densas para poder describir un frente de saturación abrupto al inicio de la precipitación. En cuanto a las propiedades hidráulicas del suelo, se utilizará el modelo de van Genuchten (1980) con parámetros adaptados a los suelos de la región.

Para la validación de la infiltración se utiliza la ecuación clásica de Philip (Philip, 1957). Los parámetros del modelo se definirán en base a los datos texturales del suelo disponibles en la literatura. Los datos meteorológicos y freaticométricos utilizados corresponden a estaciones ubicadas en el predio de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata y se considerarán representativos de zonas similares con poca o nula edificación.

## 1.2 Descripción de los contenidos

El presente trabajo ha sido estructurado en 6 capítulos cuyos contenidos se detallan a continuación. En el Capítulo 2 se introducen las variables, modelos físico-matemáticos y condiciones de borde que serán utilizados para describir y resolver el problema de la infiltración en el suelo. La resolución numérica de las ecuaciones utilizadas, junto con el modelo de infiltración empleado para validar el código numérico se describen en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados del análisis paramétrico de la infiltración en función de la cantidad de agua precipitada, texturas de suelo y la duración de la precipitación. El Capítulo 5 muestra la aplicación del modelo a la tormenta del 2 de abril de 2013 con una breve descripción y análisis de dicho fenómeno meteorológico.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo de tesis de grado.



# Capítulo 2

## Modelo conceptual

El modelo utilizado para calcular la infiltración consiste en la simulación del flujo de agua en la zona no saturada del subsuelo mediante la ecuación de Richards. Dado que el problema consiste en analizar la infiltración durante la precipitación se considera que el flujo de agua en la zona no saturada es predominantemente vertical y por eso es que se adopta un modelo unidimensional.

Las condiciones de borde que se utilizan para resolver el problema son de dos tipos: Neumann y Dirichlet. La información acerca de la textura del suelo se incluirá a través de los parámetros del modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980).

## 2.1 Variables del problema

Consideraremos el subsuelo como un medio continuo donde los parámetros que lo caracterizan se definen a partir de valores promedios sobre un volumen representativo. Bajo esta hipótesis podemos plantear leyes de conservación, leyes empíricas y el problema diferencial que representa el proceso de infiltración mediante la aproximación de medio continuo.

Supongamos un volumen elemental de suelo al que denotaremos con la letra  $V$ . Este volumen deberá incluir tanto el volumen ocupado por los poros del medio ( $V_p$ ), como el volumen ocupado por la matriz sólida del terreno ( $V_s$ ). De esta forma podemos escribir:

$$V = V_s + V_p. \quad (2.1)$$

Ahora, si se supone que el espacio poral se encuentra completamente ocupado por aire y agua, se tiene:

$$V_p = V_{aire} + V_{agua}. \quad (2.2)$$

siendo  $V_{aire}$  y  $V_{agua}$  los volúmenes de aire y agua respectivamente.

La fracción del volumen poral que esté ocupado por agua define el grado de saturación ( $S$ ):

$$S = \frac{V_{agua}}{V_p}. \quad (2.3)$$

El rango de variación de este parámetro es:

$$0 \leq S_r \leq S \leq S_s \leq 1, \quad (2.4)$$

donde  $S_r$  es la saturación residual siempre presente en el suelo y que no contribuye al flujo de agua, y  $S_s$  es la saturación máxima que admite el medio, que en presencia de aire entrampado en los poros puede ser menor que uno.

Para cuantificar el estado de humedad del subsuelo se suele utilizar el contenido volumétrico de agua  $\theta$ . Este parámetro se define como la fracción total de volumen de suelo que está ocupado por agua. Esto es:

$$\theta = \frac{V_{agua}}{V}. \quad (2.5)$$

El rango de variación de  $\theta$  también es acotado y varía entre:

$$\theta_r \leq \theta \leq \theta_s, \quad (2.6)$$

Siendo  $\theta_r$  el contenido de agua residual y  $\theta_s$  el contenido de agua máximo.

Otra variable de interés para describir la infiltración es la altura hidráulica ( $H$ ). En un punto P situado en un sistema de referencia arbitrario cuyo eje de coordenadas  $z$  coincide con la dirección de la gravedad y su sentido es positivo hacia arriba, la altura  $H$  se define como (Lamb, 1945):

$$H = h + h_u + z, \quad (2.7)$$

siendo  $h$  la altura de presión o altura piezométrica,  $h_u$  la altura de velocidad. Dado que generalmente en medios porosos las velocidades son bajas se puede desestimar  $h_u$  quedando la altura hidráulica definida como:

$$H = h + z. \quad (2.8)$$

## 2.2 Ecuación de Richards

La ecuación que gobierna el flujo de agua en un medio poroso de saturación variable bajo la hipótesis de que el fluido que ocupa el espacio poral es bifásico (aire y agua), y que la presión del aire permanece constante e igual a la presión atmosférica, es la ecuación de Richards (Richards, 1931). Mediante la hipótesis de que la presión del aire permanece constante el problema queda reducido a la fase líquida.

La ecuación de Richards se obtiene a partir de la ecuación de conservación de masa de agua (2.9) y de la ley de Buckingham-Darcy (Buckingham, 1907) (2.10) que describe el flujo de agua ( $q$ ):

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} + \frac{\partial q(h)}{\partial z} = F(h), \quad (2.9)$$

$$q(h) + K(h) \frac{\partial (h + z)}{\partial z} = 0, \quad (2.10)$$

donde  $F(h)$  representa una fuente o sumidero de agua y  $K(h)$  es la conductividad hidráulica del medio. Puede observarse como la conductividad hidráulica y el contenido de agua dependen de la altura piezométrica  $h$ .

Combinando estas dos ecuaciones se obtiene la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot (K \nabla (h + z)) = F(h). \quad (2.11)$$

En este trabajo de tesis consideramos nulo el término  $F(h)$  ya que se asume que no hay ningún tipo de aporte o extracción de agua en el medio poroso. La expresión (2.11) es válida cuando el medio

poroso es indeformable y la densidad del fluido es constante, condición que se verifica en la mayoría de los estudios de agua en zonas no saturadas.

Para poder resolver la ecuación de Richards es necesario contar con un modelo matemático que vincule las propiedades hidráulicas del suelo  $\theta$  y  $K$  con la altura de presión  $h$ . Las relaciones  $\theta(h)$  y  $K(h)$  son conocidas como relaciones constitutivas y son características del tipo de suelo. En este trabajo se optó por trabajar con el modelo constitutivo de van Genuchten (van Genuchten, 1980).

## 2.3 Modelo de van Genuchten

Si bien existen varios modelos que vinculen las propiedades hidráulicas con la altura de presión, como pueden ser el de Gardner-Russo (Gardner, 1958, Russo, 1988) o Brooks- Corey (Brooks y Corey, 1964), el modelo de van Genuchten es el que mejor ajusta los datos observados para un amplio rango de alturas de presión y por lo tanto es el más utilizado en trabajos aplicados. Las expresiones que constituyen este modelo están dadas por:

$$K(h) = \begin{cases} \frac{K_s \cdot (1 - (\alpha_{vg} |h|)^{n-1} \cdot (1 + (\alpha_{vg} |h|)^n)^{-m})^2}{(1 + (\alpha_{vg} |h|)^n)^{m/2}}, & h < 0 \\ K_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha_{vg} |h|)^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

Donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del medio;  $\alpha_{vg}$ ,  $n$  y  $m$  son parámetros del modelo. En general  $m$  y  $n$  están relacionados mediante:  $m = 1 - 1/n$ .

La Tabla 2.1 lista los parámetros de van Genuchten para las 12 texturas de suelo reconocidas. Estos valores son promedios de los parámetros medidos por Carsel y Parrish (Carsel y Parrish, 1988) para distintos suelos clasificados según su textura.

Es importante resaltar que es a partir de éstos parámetros que las características del suelo de la región bajo estudio se introducen en el modelo. Esto constituye una ventaja en relación a otros modelos para calcular la infiltración ya que permite incorporar naturalmente las características físicas del suelo.

<b>Textura</b>	<b><math>\theta_r</math></b>	<b><math>\theta_s</math></b>	<b><math>\alpha_{vg}</math></b>	<b><math>n</math></b>	<b><math>K_s</math> (cm/d)</b>
Arena	0.045	0.43	0.145	2.68	712.80
Arena margosa	0.057	0.41	0.124	2.28	350.20
Marga arenosa	0.065	0.41	0.075	1.89	106.10
Marga	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96
Limo	0.034	0.46	0.016	1.37	6.00
Limo margoso	0.067	0.45	0.020	1.41	10.80
Marga arcillo arenosa	0.100	0.39	0.059	1.48	31.44
Marga arcillosa	0.095	0.41	0.019	1.31	6.24
Marga arcillo limosa	0.089	0.43	0.010	1.23	1.68
Arcilla arenosa	0.100	0.38	0.027	1.23	2.88
Arcilla limosa	0.070	0.36	0.005	1.09	0.48
Arcilla	0.068	0.38	0.008	1.09	4.80

Tabla 2.1: Valores promedio de los parámetros del modelo de van Genuchten estimados por Carsel y Parrish (1988) para distintos tipos de suelos según su textura.

## 2.4 Condiciones de borde

Para poder resolver el modelo diferencial es necesario definir la condición inicial para el tiempo de inicio de la simulación  $t = 0$  y las condiciones de borde del problema. Dado que nuestro interés está centrado en la infiltración, las condiciones dependerán de la precipitación y del estado de humedad del suelo previo a la lluvia. Esta forma de abordar el problema permite incorporar en forma explícita las propiedades texturales del suelo de la región y obtener una descripción más realista de la evolución de la infiltración y escurrimiento durante el desarrollo de la precipitación.

La condición inicial debe reflejar el estado de humedad del suelo antes de la precipitación y debe de tener en cuenta la posición del nivel freático y el agua en tránsito por la zona no saturada.

La condición en el borde superior  $z = z_{top}$  debe describir el ingreso de agua al suelo, lo cual puede realizarse mediante dos tipos de condiciones de borde:

- Condición tipo Dirichlet: Esta condición se utiliza cuando el suelo se encuentra inundado o encharcado y se expresa como:

$$h(z_{top}) = h_{top}, \quad (2.14)$$

donde  $h_{top}$  es la altura de la lámina de agua respecto al terreno. Su signo será positivo cuando se encuentre sobre el terreno y negativo cuando esté por debajo de éste.

- Condición Tipo Neumann: En este caso la condición propuesta especifica el flujo de agua que ingresa al suelo. Este flujo está condicionado por la cantidad de agua que admite el terreno, lo cual está directamente relacionado con el estado de humedad del suelo y la conductividad hidráulica saturada  $k_s$  del mismo. Esto puede expresarse del siguiente modo:

$$q(z_{top}) = q_{top} = \begin{cases} q_{in} & \text{si } q_{in} < K_s \\ \mu K_s & \text{si } q_{in} \geq K_s \end{cases}, \quad (2.15)$$

En la Ecuación (2.15) puede verse que si la precipitación  $q_{in}$  es baja en comparación con lo que puede tolerar el suelo, la condición de borde estará dada por la parte superior de la expresión 2.15. En esta situación el agua puede infiltrar en su totalidad al terreno.

Ahora, si la precipitación excede lo que admite el suelo queda acotada con la segunda parte de la condición de borde, y el agua que no alcanza a ingresar en el terreno se transforma automáticamente en escorrentía superficial. La cota se realiza con el factor mu ( $\mu$ ) que es un parámetro que tiene en cuenta la resistencia superficial del terreno al ingreso de agua. Este factor en general es cercano a uno y en nuestro caso fue de 0.9.

La condición de borde inferior ( $z = z_{bot}$ ) tiene que describir el egreso/ingreso de agua a través del dominio considerado. Este proceso puede modelarse mediante dos tipos de condiciones de borde:

- Condición Tipo Dirichlet:

$$h(z_{bot}) = h_{bot}, \quad (2.16)$$

donde  $h_{bot}$  representa la altura piezométrica medida en la base del dominio.

- Condición Tipo Neumann:

$$q(z_{bot}) = q_{bot}, \quad (2.17)$$

siendo  $q_{bot}$  el flujo de agua a través del borde inferior.

En el siguiente Capítulo se describirá brevemente el método numérico utilizado para resolver el problema diferencial planteado.

# Capítulo 3

## Modelo numérico

Para obtener la infiltración del agua en el subsuelo, como se mencionó en el capítulo anterior, debe resolverse la ecuación de Richards en forma numérica. Para ello se adaptó un código numérico FORTRAN donde se utiliza un esquema backward Euler para la discretización temporal, combinado con un método de Picard modificado. En cuanto a la discretización espacial se utiliza un Método Mixto de Elementos Finitos (MMEF).

### 3.1 Modelo diferencial

Para poder resolver el problema diferencial se considera un dominio vertical, perpendicular al suelo, que se extiende desde un punto ubicado por debajo del nivel freático  $z_{bot}$  hasta un punto ubicado en superficie  $z_{top}$ . Por conveniencia se expresa la ecuación de Richards en su forma mixta quedando el problema diferencial definido del siguiente modo:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} + \frac{\partial q(h)}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.1)$$

$$q(h) + K(h) \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.2)$$

$$h(z_{top}) = h_{top} \quad \text{ó} \quad q(z_{top}) = q_{top} \quad (3.3)$$

$$h(z_{bot}) = h_{bot} \quad \text{ó} \quad q(z_{bot}) = q_{bot} \quad (3.4)$$

$$h(z) = h_{ini} \quad t = 0 \quad (3.5)$$



## 3.2 Discretización temporal y linealización

La discretización temporal del sistema (3.1) - (3.5) se realiza mediante un esquema backward Euler combinado con un método iterativo de Picard modificado para tratar los términos no lineales.

El esquema backward Euler se expresa como:

$$\frac{\theta^{n+1} - \theta^n}{\Delta t} + \frac{\partial q^{n+1}}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.6)$$

$$q^{n+1} + K^{n+1} \cdot \frac{\partial(h^{n+1} + z)}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.7)$$

$$h^{n+1} = h_{top}^{n+1} \quad \text{o} \quad q^{n+1} = q_{top}^{n+1}, \quad z = z_{top} \quad (3.8)$$

$$h^{n+1} = h_{bot}^{n+1} \quad \text{o} \quad q^{n+1} = q_{bot}^{n+1}, \quad z = z_{bot} \quad (3.9)$$

$$h^0 = h_{ini}, \quad t = 0 \quad (3.10)$$

donde el supra índice  $n+1$  indica la evaluación de las variables al tiempo discreto  $t^{n+1}$ .

La linealización del sistema (3.6) - (3.10) mediante el método de Picard modificado propuesto por Celia et al (1990), se expresa:

$$\frac{\theta^{n+1,i} - \theta^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\partial \theta^{n+1,i}}{\partial h} (h^{n+1,i+1} - h^{n+1,i}) + \frac{\partial q^{n+1,i+1}}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.11)$$

$$q^{n+1,i+1} + K^{n+1,i} \cdot \frac{\partial(h^{n+1,i+1} + z)}{\partial z} = 0, \quad z \in (z_{bot}, z_{top}) \quad (3.12)$$

$$h^{n+1,i+1} = h_{top}^{n+1} \quad q^{n+1,i+1} = q_{top}^{n+1}, \quad z = z_{top} \quad (3.13)$$

$$h^{n+1,i+1} = h_{bot}^{n+1} \quad q^{n+1,i+1} = q_{bot}^{n+1}, \quad z = z_{bot} \quad (3.14)$$

$$h^0 = h_{ini}, \quad (3.15)$$

donde el supra índice  $i$  indica el nivel de iteración del método de Picard.

### 3.3 Discretización espacial

Para discretizar espacialmente el sistema (3.11) - (3.15) se emplea un método mixto híbrido de elementos finitos (MMEF). Este método permite aproximar en forma simultánea tanto una variable escalar como su gradiente espacial. En nuestro caso particular permite aproximar dos variables con significado físico como son la altura de presión  $h$  y el flujo de agua  $q$ . Otra virtud de los MMEF es que conserva la masa de agua de forma local, es decir, se satisface la ecuación de conservación de la masa en cada una de las celdas de la malla con la que se discretiza el espacio.

Para implementar el método deben definirse dos espacios de funciones: uno vectorial para aproximar  $q$  y otro escalar para  $h$ . Los detalles de la implementación escapan a los objetivos de este trabajo de tesis y pueden encontrarse en el trabajo de tesis doctoral del Dr. Luis Guarracino (Guarracino, 2001).

Como resultado de la discretización espacial debe resolverse un sistema de ecuaciones tridiagonal cuyas incógnitas son los valores de la altura piezométrica  $h$  en el centro de cada celda. El programa para resolver el problema fue escrito en lenguaje FORTRAN.

### 3.4 Validación del modelo

Como todo modelo físico implementado es necesario validarlo con algún otro modelo conocido que funcione tanto en la teoría como en la práctica. Existen varios modelos de infiltración que podrían ser útiles para comparar los resultados, algunos de ellos son el de Horton (Horton, 1933), Kostiakov (Ravi y Williams, 1998), Lewis-Kostiakov (Ahuja et al, 2007) y Green-Ampt (Masuelli y Barrera, 2010). En este trabajo se utilizó la ecuación de Philip (Philip, 1957) por su simpleza y por ser uno de los modelos más utilizados en trabajos aplicados.

Mediante una serie de aproximaciones y simplificaciones de la ecuación de Richards, Philip obtuvo una expresión manejable para la infiltración en términos de  $t^{1/2}$ :

$$q(t) = \frac{1}{2} S_0 t^{\frac{1}{2}} + A. \quad (3.16)$$

siendo  $q$  la infiltración o tasa de infiltración,  $S_0$  la sorbilidad o sortividad,  $A$  una fracción de la conductividad hidráulica de saturación del suelo y  $t$  el tiempo desde el inicio del encharcamiento en un suelo uniforme. Si no existiese el efecto del aire atrapado en el interior del suelo dificultando la infiltración, el parámetro  $A$  sería igual a la conductividad hidráulica saturada. Debido a la existencia de dicho efecto, normalmente,  $A$  es menor a  $K_s$ . La sorbilidad es un parámetro que influye en la infiltración inicial del agua y depende de las características del suelo.

Para el cálculo de la infiltración con el modelo propuesto se utilizó un dominio de 4 metros de profundidad con el nivel freático ubicado a 2 metros de profundidad. El tiempo de simulación fue de un día. Mientras que para la discretización espacial fueron utilizadas mallas regulares de 700 a 1000 nodos, para la discretización temporal se utilizaron de 30 a 60 segundos. La condición de borde utilizada debe reflejar el fenómeno de la infiltración considerado por Philip en su ecuación (3.16), por lo que se utilizó la condición tipo Dirichlet (2.15) mencionada en el Capítulo 2.

Una vez calculada la infiltración con el modelo basado en la ecuación Richards se comparó con la infiltración calculada con la ecuación de Philip obteniendo muy buenos ajustes. En las Figuras (3.1) y (3.2) se muestran los resultados obtenidos con ambos métodos para texturas limosa y marga-arenosa. Los parámetros del modelo de van Genuchten utilizados para calcular la infiltración se encuentran en la Tabla (2.1) y los parámetros ajustados de la ecuación de Philip se listan en la Tabla (3.1):

<b>Textura</b>	<b>Sorbilidad</b>	<b>A</b>
Marga arenosa	1.3	1.17
Limo	4.7	0.5

Tabla 3.1: Valores utilizados para calcular la infiltración con la ecuación de Philip para las texturas marga-arenosa y limo.

Se observa un buen ajuste en ambos casos, lo que valida la utilización del modelo propuesto para el cálculo de la infiltración en escenarios más realistas.

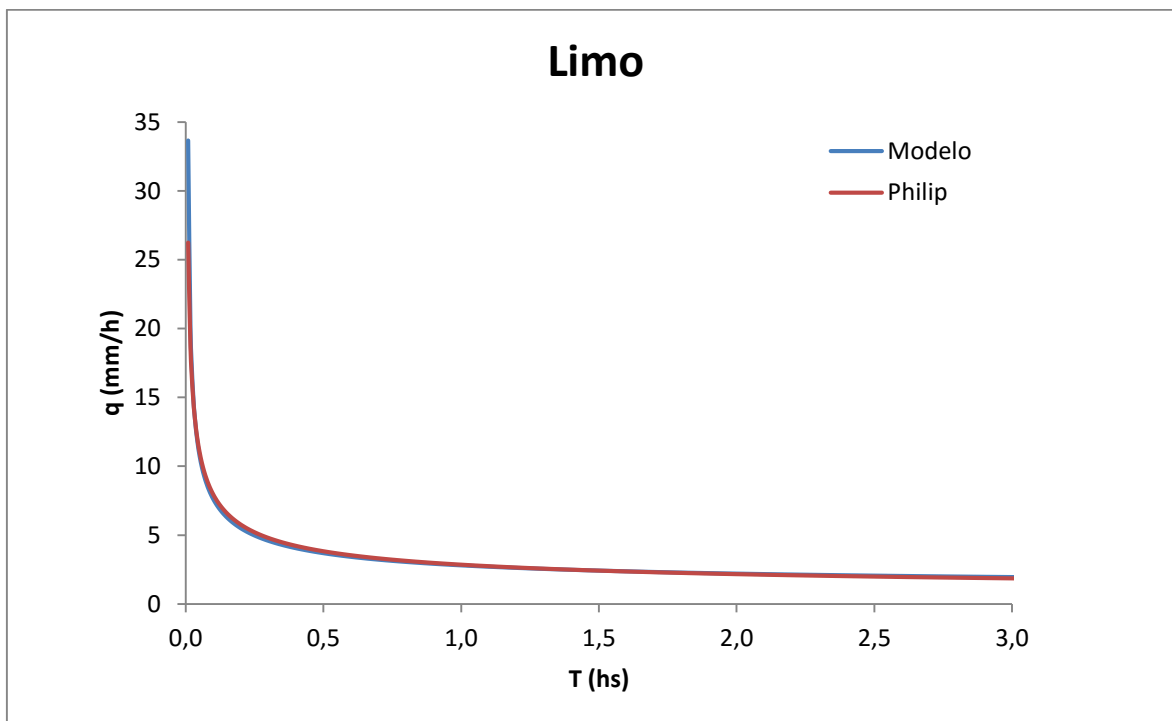


Figura 3.1: Infiltración de un suelo con textura limosa calculada con la ecuación de Philip y el modelo propuesto.

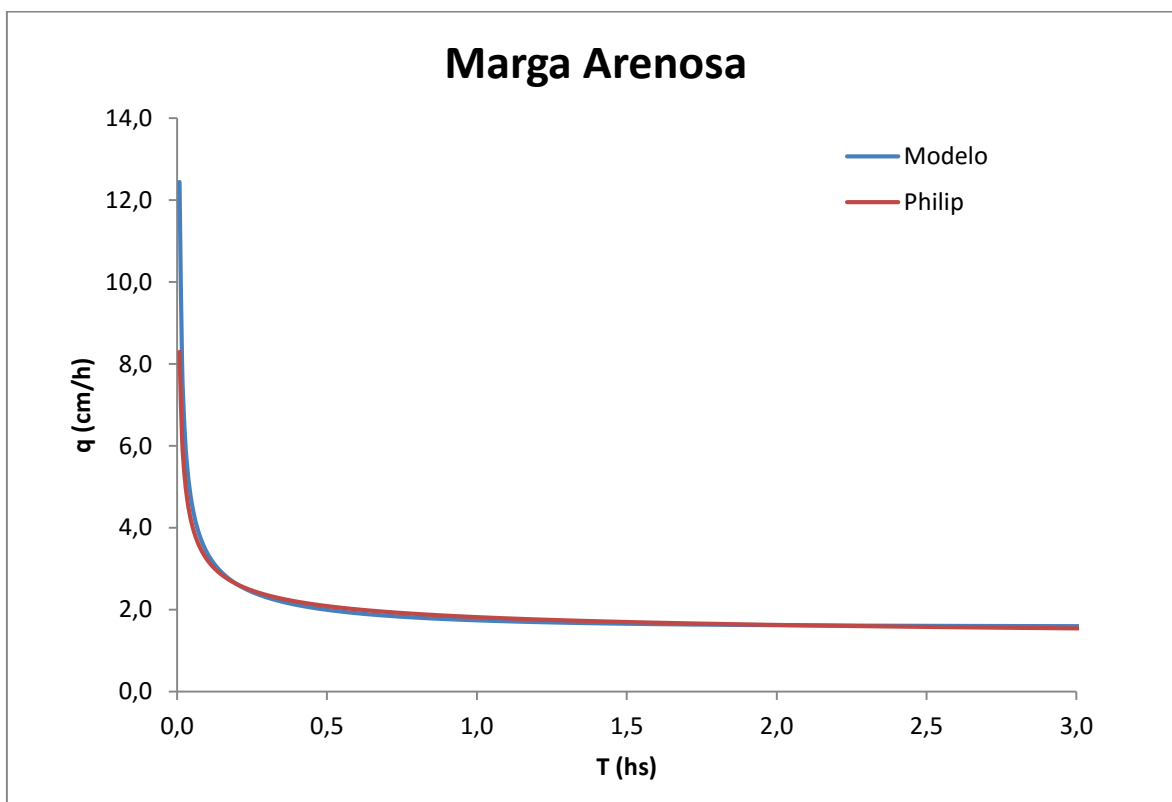


Figura 3.2: Infiltración de un suelo con textura Marga-arenosa calculada con la ecuación de Philip y el modelo propuesto.

# Capítulo 4

## Análisis paramétrico

Luego de validar el modelo se realizó un análisis paramétrico para estudiar el comportamiento de la infiltración ante variaciones de los parámetros del suelo, la cantidad de agua precipitada y duración de la precipitación. Para este análisis las condiciones de borde utilizadas son las de tipo Neumann mencionadas en el Capítulo 2.

### 4.1 Cantidad de agua precipitada

Para este análisis paramétrico se utilizaron valores de lluvia horarios, siendo de 24 horas el tiempo total de la simulación. El dominio de trabajo fue un perfil de 14 metros de profundidad con el nivel freático ubicado a 12 metros desde el suelo.

Para el análisis se asume una precipitación escalonada de 4 horas de duración entre las 5 y las 9 horas. La cantidad de agua total precipitada se distribuye según el siguiente régimen: 10% la primer hora, 30% la segunda, 50% la tercera y 10% la cuarta hora de simulación (ver Figura 4.1).

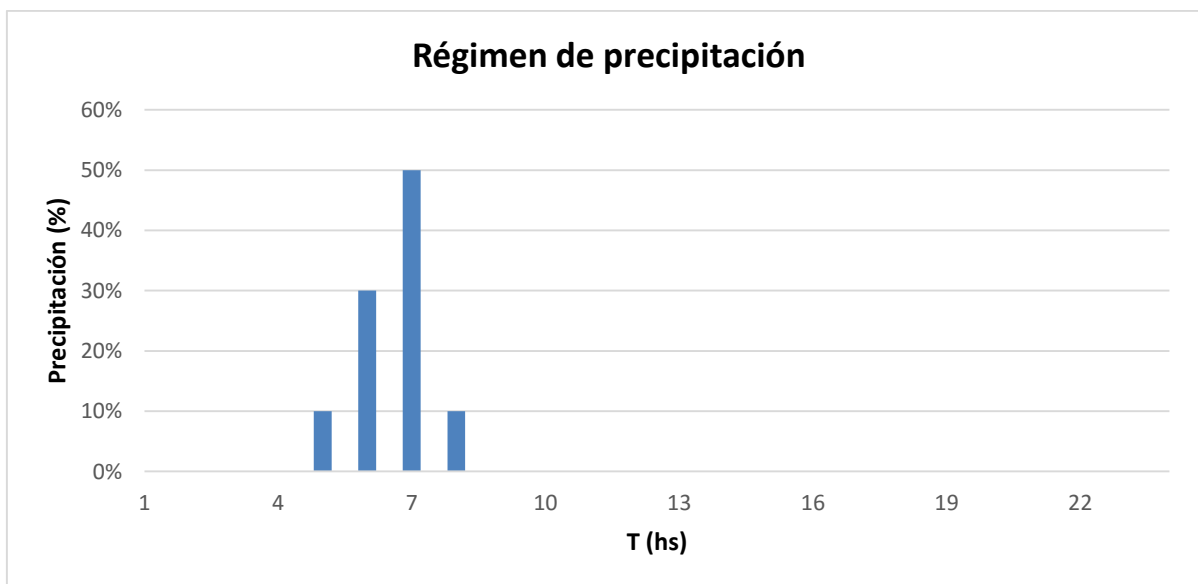


Figura 4.1: Régimen de precipitación propuesto para el análisis paramétrico.

En la Figura 4.2 puede observarse como responde la infiltración en un suelo de textura margo arcillo arenosa ante una lluvia de intensidad total de 5 mm, 10 mm y 20 mm.

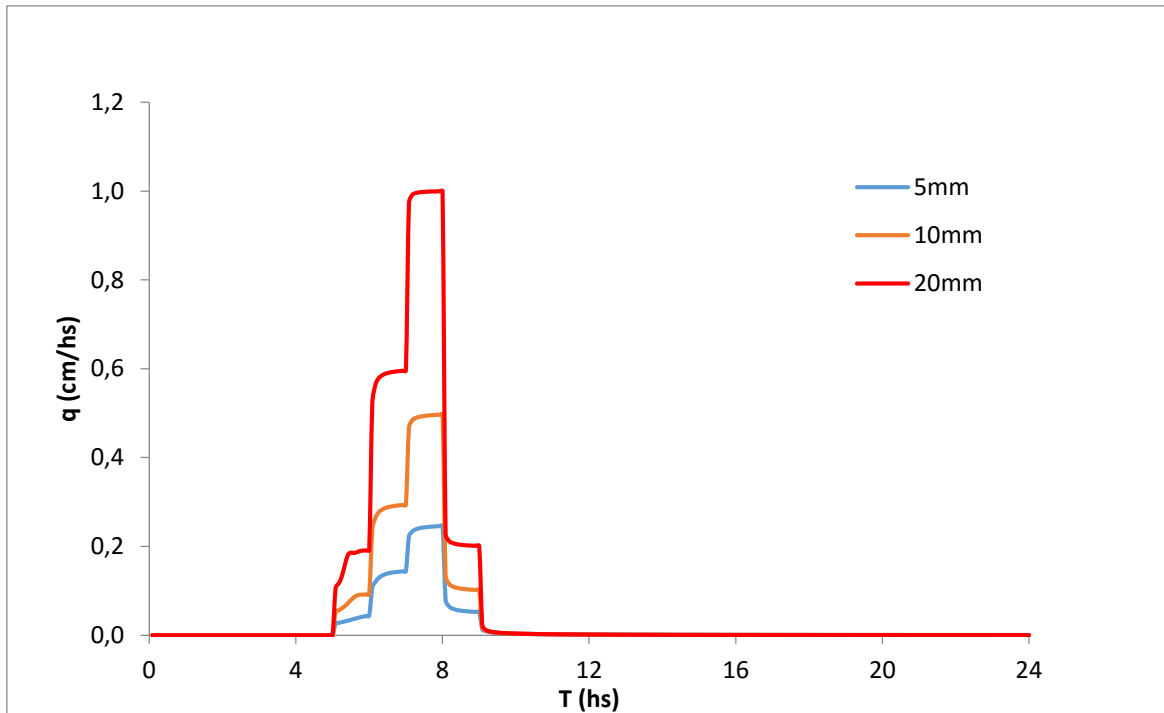


Figura 4.2: Análisis paramétrico de infiltración en una textura margo arcillo arenosa según intensidad de la lluvia.

La textura elegida es de una conductividad intermedia respecto de las 12 texturas elegidas por Carsel y Parrish (1988). Puede observarse como aumenta la infiltración con el aumento gradual de la intensidad de la lluvia. Es de notar como la infiltración siempre responde lento al inicio de la precipitación. Esto se debe a que a medida que el suelo comienza a humedecerse aumenta la conductividad hidráulica favoreciendo la infiltración del agua.

## 4.2 Textura del suelo

En este análisis paramétrico nuevamente se utilizaron valores de lluvia horarios y la simulación fue de un día. El dominio de trabajo es el mismo perfil de 14 metros de profundidad con la tabla de agua o nivel freático ubicado a 12 metros del suelo.

Para la simulación se propuso una lluvia escalonada entre las 5 y las 9 horas siguiendo el mismo régimen de precipitación. Se tomó un valor de precipitación fijo de 20mm y se observó como variaba la infiltración según las diferentes texturas de suelo entre esas horas. En la Figura 4.3 puede observarse como responde la infiltración a 2 tipos de texturas diferentes: marga y limo.

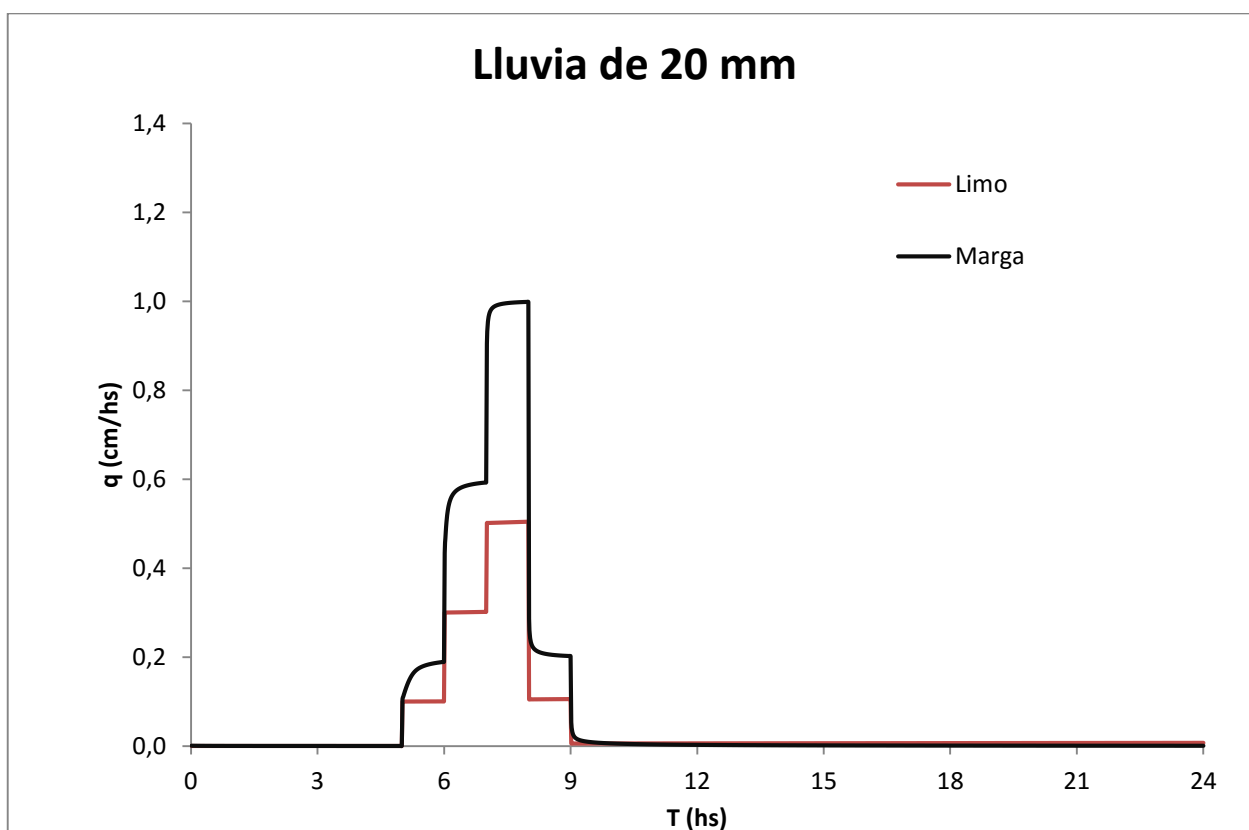


Figura 4.3: Análisis paramétrico de la infiltración para lluvia constante y diferentes texturas.

Notar que la marga tiene una infiltración similar cercana al 100% de la precipitación, mientras que el limo, con una conductividad hidráulica mucho menor que la otra textura produce una infiltración menor. El agua que no alcanza a infiltrar con esta última textura se convierte inmediatamente en escorrentía superficial fluyendo hacia los lugares bajos de la zona.

### 4.3 Duración de la tormenta

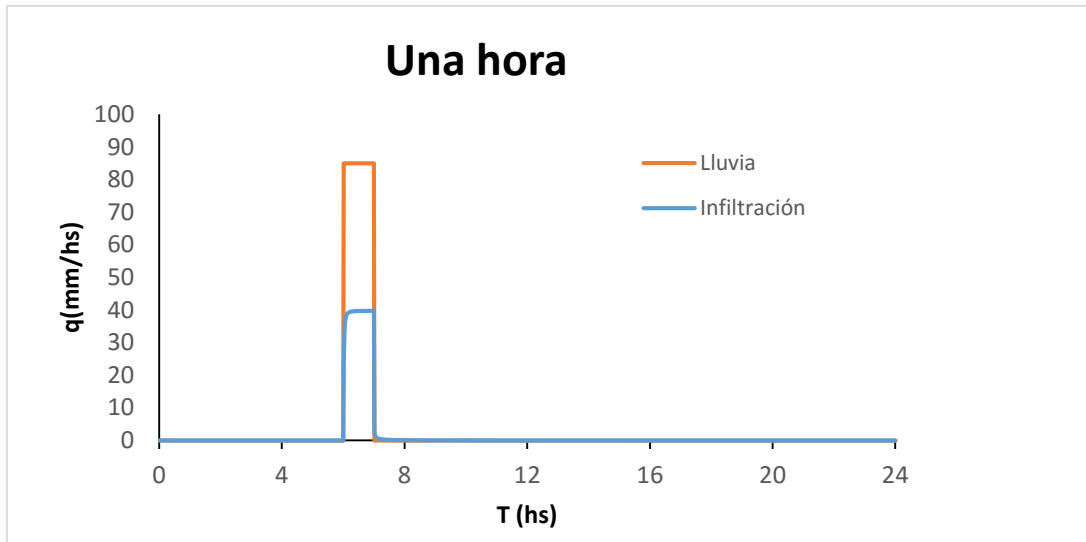


Figura 4.4: Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en una hora.

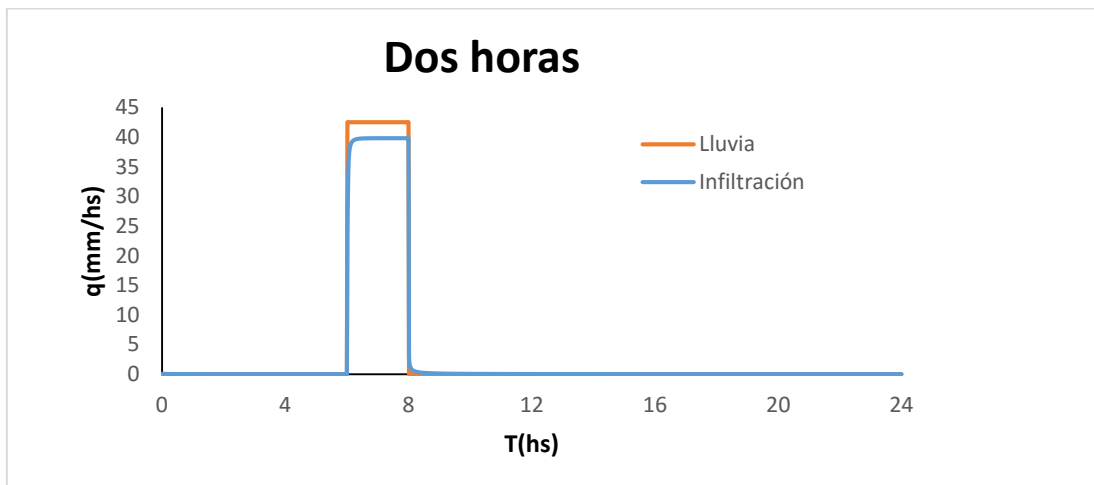


Figura 4.5: Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en dos horas.

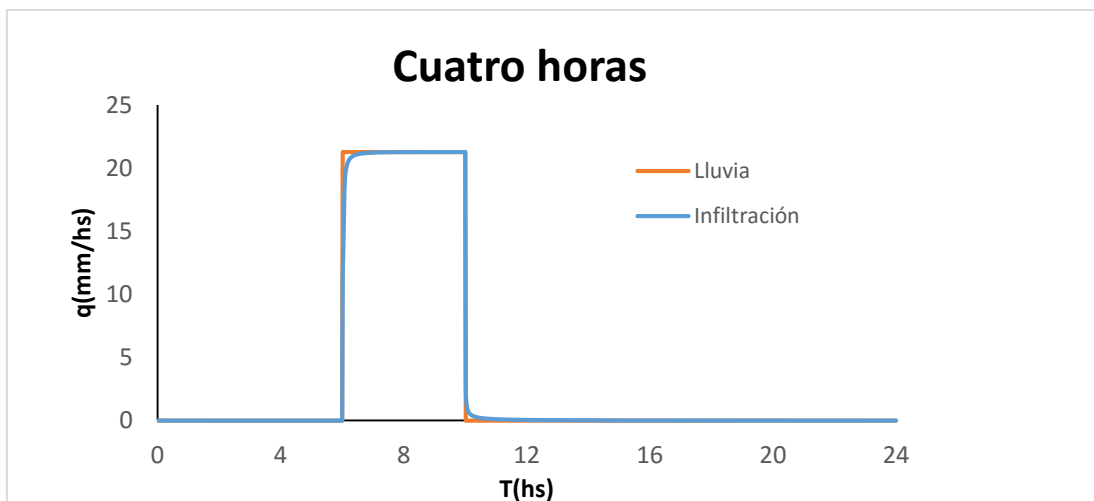


Figura 4.6: Análisis Paramétrico de una textura margo arenosa con 85mm de lluvia en cuatro horas.



En este análisis se evalúa cómo afecta a la infiltración la misma cantidad de agua precipitada en intervalos de tiempo de distinta duración. La simulación fue de un día y el dominio de trabajo es el mismo que en los ejemplos anteriores.

La cantidad de agua precipitada se fijó en 85 mm distribuidos uniformemente en intervalos de 1, 2 y 4 horas. En las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 puede observarse la infiltración estimada por el modelo para cada uno de los casos. Como es de esperar, la cantidad de agua que infiltra en el terreno depende de la duración de la tormenta. De los 85 mm caídos en una hora (Figura 4.4), el modelo predice que solo el 47% del agua podrá ingresar al suelo convirtiendo el excedente de agua que queda en superficie en escorrentía superficial. Esta misma cantidad de agua en un intervalo de 2 horas (Figura 4.5) es absorbida en un 94% por el terreno. Finalmente, puede observarse que esta cantidad de agua distribuida en 4 horas es absorbida por completo (Figura 4.6).

# Capítulo 5

## Aplicación del modelo

En este Capítulo el modelo de infiltración es utilizado para analizar una tormenta intensa real. Para dicho análisis se escogió la tormenta del día 2 de abril de 2013 en la ciudad de La Plata. La elección no fue arbitraria, sino que motivó el desarrollo de este plan de tesis por la magnitud de la catástrofe en la ciudad y porque puso de manifiesto la escasez de información hidrometeorológica y la falta de modelos predictivos calibrados para la región. Se espera que estos resultados contribuyan a comprender mejor estos fenómenos y puedan ser utilizados en la evaluación del riesgo hídrico de la región.

### 5.1 Tormenta del 2 de abril de 2013

Durante el evento meteorológico del 2 de abril de 2013 se registraron 392.2 mm de agua en la estación meteorológica ubicada en el predio de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata. Del total de agua precipitada, 370.4 mm cayeron entre las 16 horas y las 23 horas, intervalo de tiempo claramente pequeño para la cantidad de agua precipitada. Esta cantidad de agua en un lapso de tiempo corto dió origen a importantes escorrentías superficiales y anegamientos en las zonas de menor cota topográfica. El resultado final fue una inundación sin precedentes en la ciudad, la cual dejó una gran pérdida en lo material y humano. El volumen de agua caída durante la tormenta representa aproximadamente el 35% del promedio medio anual para la región.

En la Figura 5.1 se muestra la lluvia acumulada por hora durante el día 2 de abril de 2013. Los datos de la precipitación fueron tomados del Boletín de Noticias Número 332 de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas del 26 de abril de 2013. A partir de estos datos se calculará la infiltración y se realizará una estimación de la escorrentía superficial.

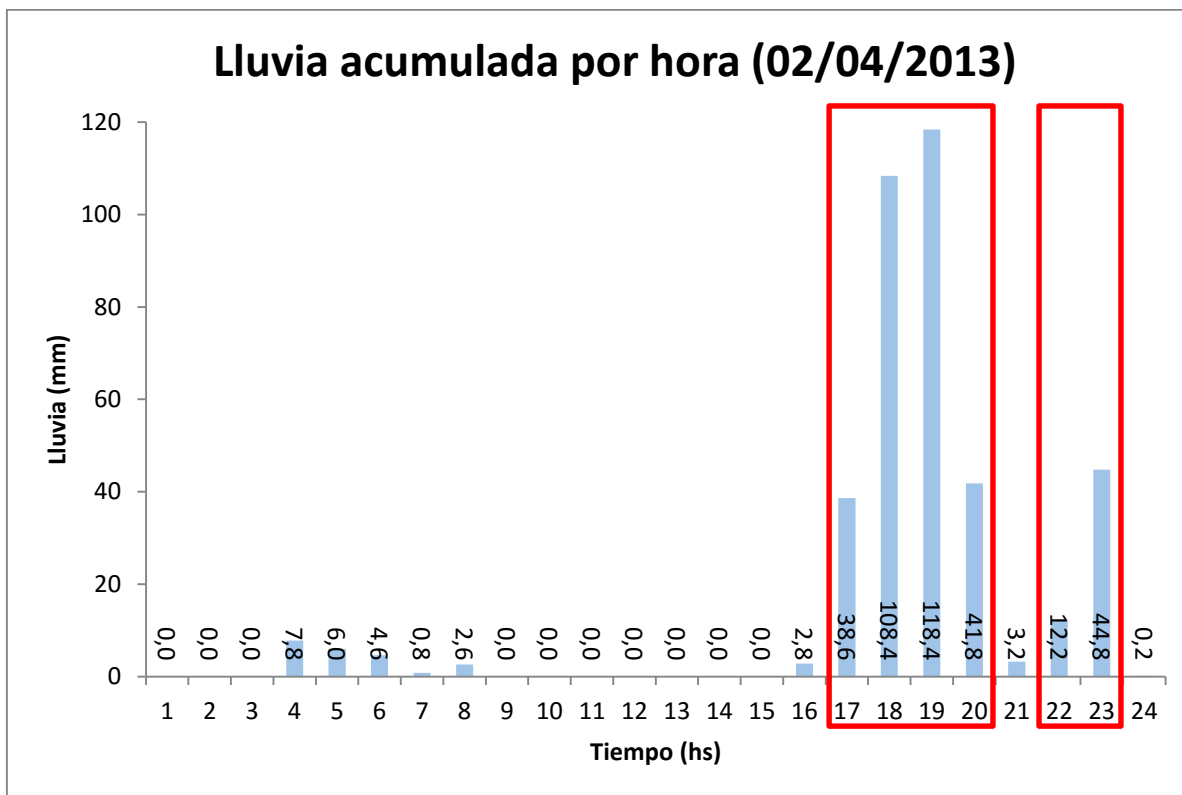


Figura 5.1: Lluvia acumulada registrada durante el 02/04/2013 en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP. En rojo se ven los segmentos de mayor intensidad de la precipitación.

## 5.2 Cálculo y análisis de la infiltración

Para calcular la infiltración durante esta tormenta intensa en la ciudad de La Plata se utilizaron parámetros que definen el modelo hidrológico en la zona donde se realizaron las mediciones de la lluvia. Es así que se consideró un dominio de 14 metros de profundidad con la tabla de agua o nivel freático a 12 metros de profundidad, estimado a partir de las mediciones del freatígrafo ubicado en la FCAGLP. El tipo de suelo es fundamental para analizar la infiltración, como se demostró en el Capítulo anterior, y se considera por las características hidráulicas que la textura que mejor define al suelo platense es la marga-arenosa (ver Tabla 2.1).

El tiempo de simulación fue de un día y se utilizaron valores de lluvia horarios. En este problema donde nos interesa cuantificar el ingreso del agua de la tormenta al subsuelo se propuso que la condición de borde a utilizar, para resolver el problema diferencial, sea la de tipo Neumann, descripta en el capítulo 2. Las mallas utilizadas para la discretización espacial fueron de 1200 a 3500 nodos y la discretización temporal fue de 30 a 300 segundos.

En la Figura 5.2 puede observarse la infiltración calculada con el modelo propuesto junto con la lluvia precipitada durante el día de la tormenta.

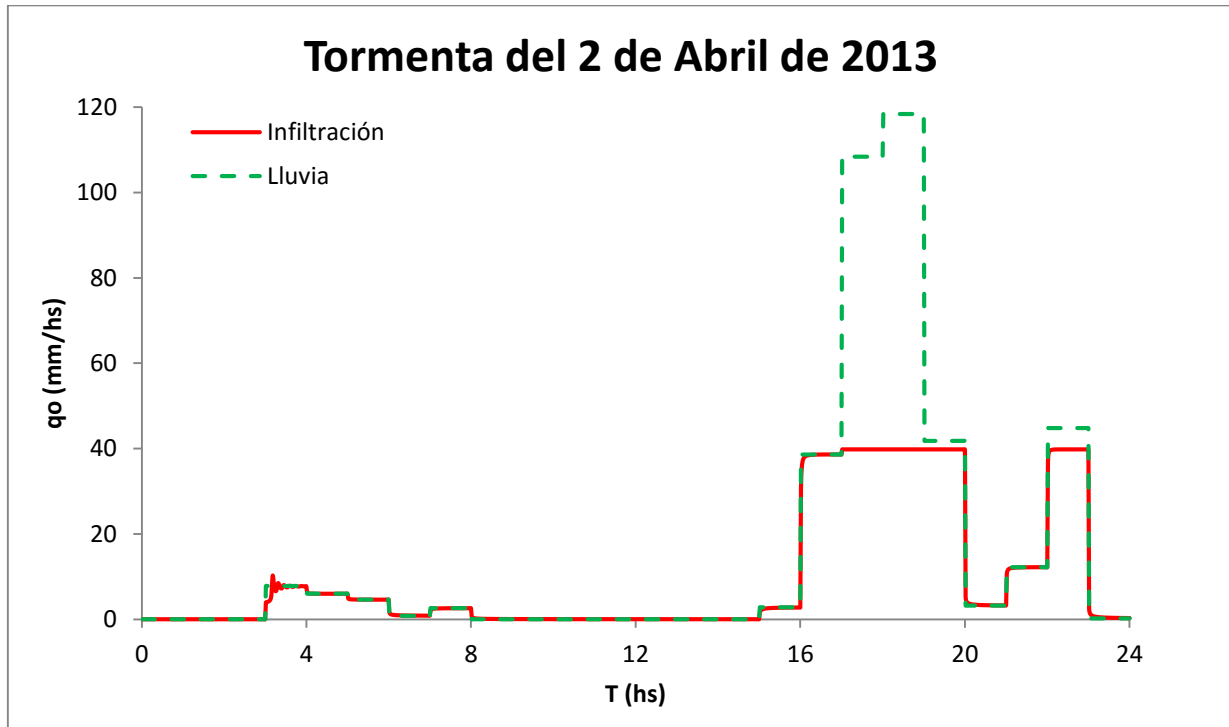


Figura 5.2: Infiltración calculada y lluvia precipitada durante el 02/04/2013.

En la figura puede observarse la evolución de la infiltración y los períodos donde se produciría escorrentía superficial. Es notable como la lluvia de las primeras horas del día pudo ser absorbida por el terreno en su totalidad. Ahora, a partir de las 16 horas el modelo predice que no toda el agua de la tormenta alcanza a infiltrar en el suelo, principalmente entre las 17 y las 20 horas. Esta diferencia entre la infiltración y la precipitación se debe a que el suelo se encuentra saturado en las proximidades de la superficie, y el excedente de agua deviene en escorrentía superficial migrando hacia los lugares de menor cota topográfica, contribuyendo de esta manera a la inundación generada por la tormenta. Esta predicción del modelo se corresponde con los hechos ocurridos ese día.

Habiendo calculado la cantidad de agua infiltrada en el suelo durante el evento y el agua precipitada es posible estimar la cantidad de agua que generó la escorrentía responsable de la inundación. Bajo las hipótesis supuestas se estima que la escorrentía superficial fue del 39% del agua caída.

Para analizar el proceso de infiltración en el suelo se graficaron los perfiles de contenido de agua cada 3 horas. En la Figura 5.3 se ilustran los perfiles completos para el dominio de simulación, mientras que en la Figura 5.4 se muestra en detalle la zona más superficial del subsuelo y los perfiles desde el mediodía. En esta última Figura se tienen los perfiles correspondientes a los segmentos horarios de mayor intensidad de precipitación. Estos quedan definidos como el de mayor intensidad entre las 17 y las 20 horas del día y el segundo segmento, de menor intensidad que el primero, entre las 22 y 23 horas (Ver Figura 5.1).

Puede observarse de las figuras que durante las primeras horas se produce un frente de avance que no logra saturar el terreno cerca de la superficie. A las 18 horas se ha alcanzado la saturación superficial encontrándose los primeros 35 cm del suelo completamente saturados. Ya para el final del acontecimiento, si bien hay una fluctuación en el grado de saturación del suelo debido a que a las 21 horas bajó fuertemente la intensidad de la lluvia (ver Figura 5.1), a las 23 horas se puede ver en la Figura 5.4 el efecto del incremento en la intensidad de la precipitación hacia las 22 horas. En esta instancia el suelo se encuentra nuevamente saturado encontrándose los primeros 65 cm del suelo completamente saturados.

Además del contenido de agua para el análisis de la infiltración se obtuvieron los perfiles del flujo de agua a las 15 horas, 18 horas y 21 horas. En la Figura 5.5 se muestran estos perfiles en el primer metro de suelo. En dicha Figura se ve un perfil antes del segmento horario de mayor intensidad, un perfil durante el mismo y otro posterior. La curva celeste de la Figura 5.5 muestra que no hay flujo antes del comienzo de la lluvia. En color rojo puede verse como es el flujo a la hora de mayor intensidad de la tormenta, donde se observa la mayor velocidad que admite el suelo y es cuando no puede ingresar más agua al terreno. Finalmente, la curva verde muestra el efecto del flujo de agua al disminuir la precipitación significativamente. Puede verse como el flujo se reduce y como va ingresando el agua en profundidad. En esta última instancia el agua que cae puede infiltrar en el terreno.

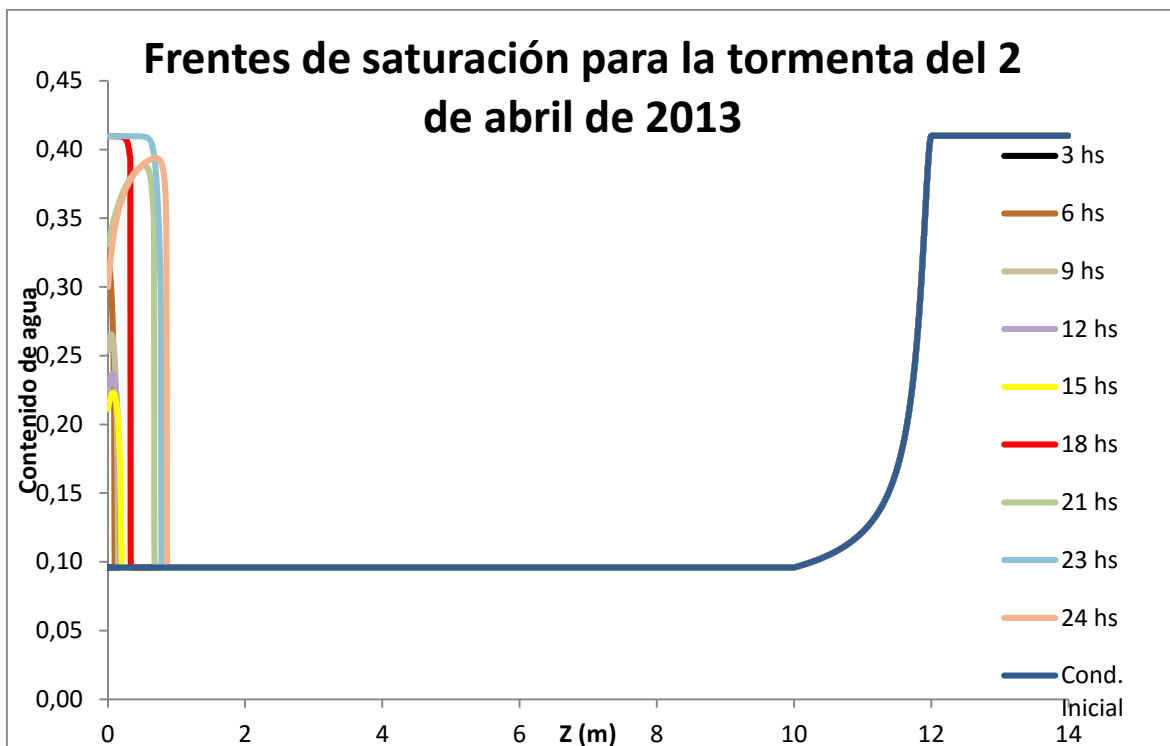


Figura 5.3: Frentes de saturación del día para la tormenta del 2 de abril de 2013

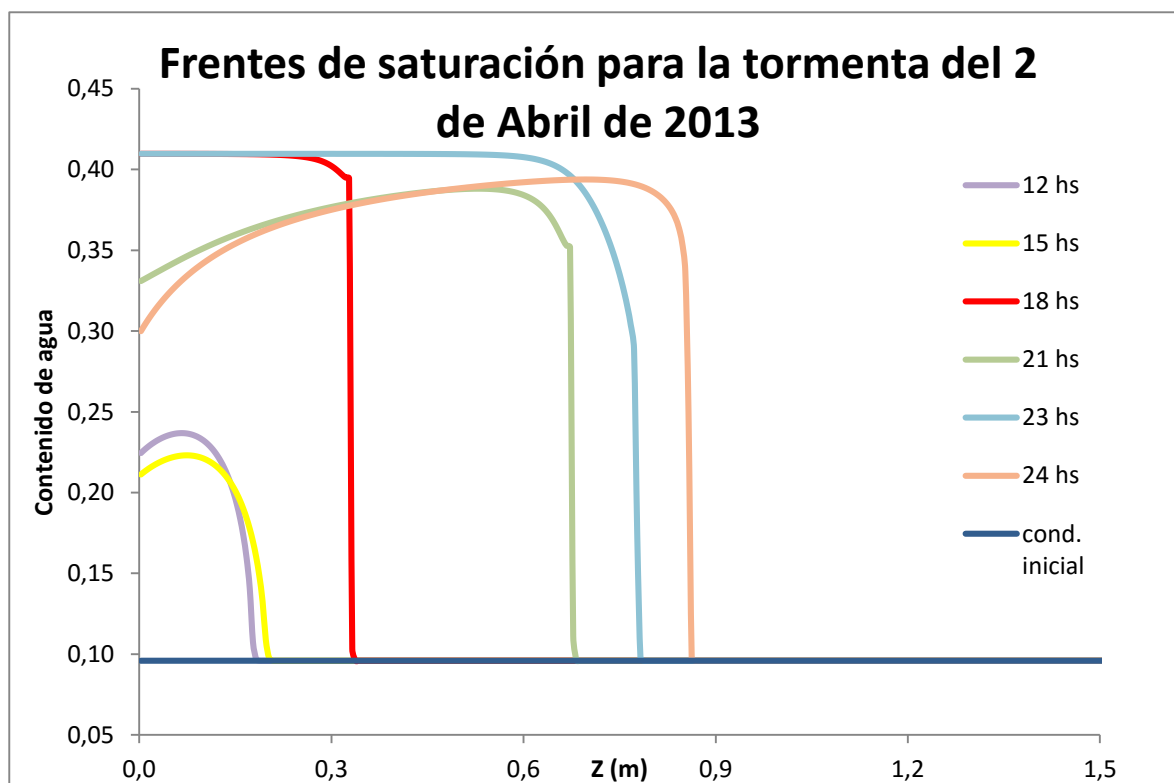


Figura 5.4: Frentes de saturación de las horas mas intensas de la tormenta del 2 de abril de 2013 .

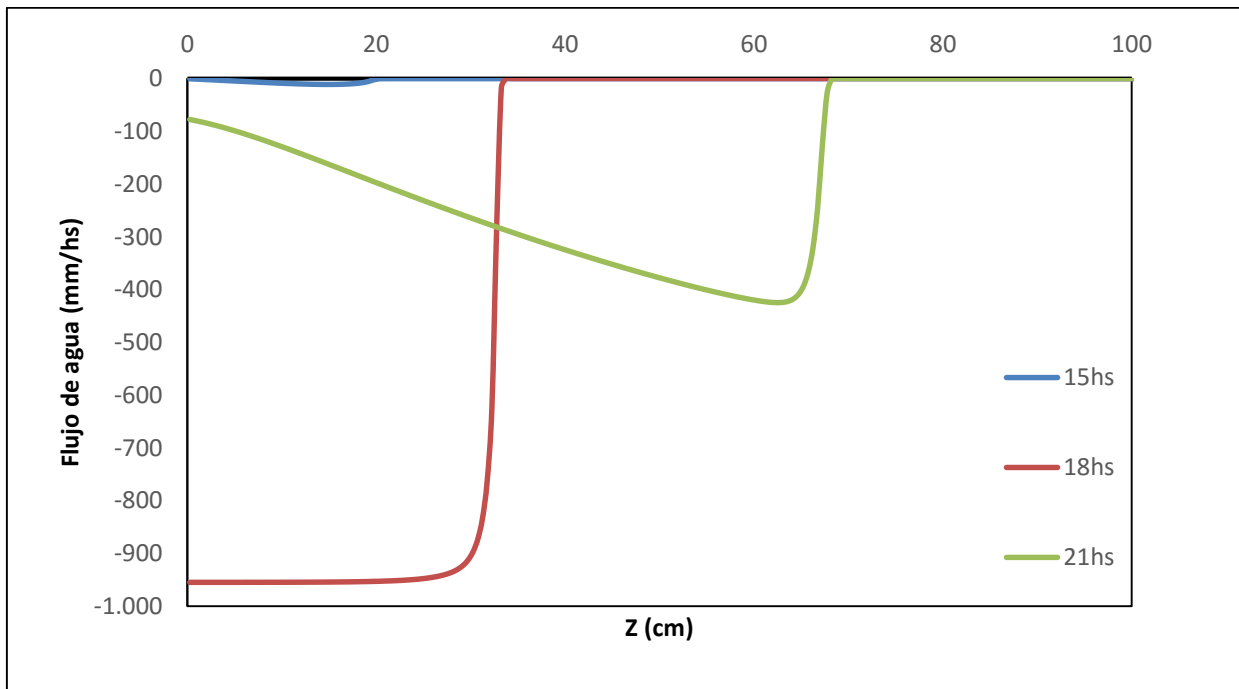


Figura 5.5: Perfiles de flujo de agua a las 15 hs, 18 hs y 21 hs.

# Capítulo 6

## Conclusiones

La cuantificación de la infiltración en suelos durante una tormenta intensa es un tema de gran relevancia en diferentes problemas de la hidrogeología. Una vez alcanzada la capacidad máxima de infiltración de agua tiene lugar la escorrentía superficial, la cual puede causar inundaciones de diversa magnitud con importantes pérdidas materiales y humanas. El objetivo de este trabajo fue modelar la infiltración durante tormentas severas resolviendo la ecuación de Richards con condiciones de borde apropiadas.

El modelo numérico implementado se basó en la resolución de esta ecuación utilizando un método mixto de elementos finitos combinado con un método iterativo de Picard modificado para tratar los términos no lineales. Las condiciones de borde pueden ser tipo Neumann, cuando no hay encharcamiento y de tipo Dirichlet cuando se tiene anegamiento superficial de agua. Dado el problema físico, la simulación se considera unidimensional y se utilizan mallas densas para poder describir el frente de saturación durante la precipitación. El contenido volumétrico de agua y la conductividad hidráulica se describen mediante el modelo de van Genuchten.

Con el código implementado se procedió a analizar la infiltración en diferentes tipos de suelos clasificados según su textura. Los resultados obtenidos con la simulación fueron satisfactoriamente validados con la ecuación de Philip. Validado el código numérico se realizó un análisis paramétrico para estudiar la infiltración según la textura del suelo, la cantidad de agua caída y la duración de la precipitación.

Finalmente se procedió a estimar la infiltración de la tormenta del 2 de abril de 2013 ocurrida en la ciudad de La Plata. Durante este evento se registraron unos 392,2 mm de agua en un período relativamente breve de tiempo, generando una inundación con grandes pérdidas humanas y materiales. La simulación nos permitió realizar una estimación de la cantidad de agua que devino en escorrentía, provocando la inundación. El valor predicho por el modelo fue de un 39% de la precipitación.



En base a los resultados presentados se puede concluir que el código implementado con las condiciones de borde propuestas para resolver la ecuación de Richards simula satisfactoriamente la infiltración de agua en diferentes suelos con distintos estados de humedad, y resulta de utilidad para analizar el agua infiltrada y transformada en escorrentía superficial durante tormentas de gran magnitud. Este modelo sirve de base para comprender mejor estos fenómenos y puede resultar de utilidad para evaluar el riesgo hídrico de la región.

# Referencias:

1. Ahuja, L. R., Kozak, J. A., Andales, A. A., Ma, L. 2007. Scaling parameters of the lewis\_kostiakov water infiltration equation across soil textural classes and extension to rain infiltration. *Transactions of the ASABE* (American Society Of Agricultural And Biological Engineers) 50(5):1525-1541 . ISSN 0001-2351
2. Brooks, R. H. and Corey A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins.
3. Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. Technical report. Washington, D.C. U.S. Department of Agriculture. Bureau of soil Bulletin 38.
4. Carsel, R. F. and Parrish, R. S. 1988. Developing joint probability distributions of soilwater characteristics. *Water Resour. Res.*, 24:755-769.
5. Celia, M. A., Bouloutas, E. T., Zarba R. L., 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research* 26, 1483-1496.
6. Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., Voltz M., 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology* 306, 191-214.
7. Corradini, C., Melone, F., Smith, R., 1994. Modelling infiltration during complex rainfall sequences. *Water Resources Research* 30 (10), 2777-2784.
8. Gardner, W. R., 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85:228-232.
9. Guarracino, L., 2001. Modelado numérico del flujo de aguas subterráneas y transporte de solutos en medios porosos heterogéneos. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
10. Guarracino, L., Cesanelli, A., 2008. Modelado de la evaporación en suelos mediante una condición de borde no lineal en la ecuación de Richards. *Mecánica Computacional* 27, 337-350.
11. Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, L., Schmitz, G., Fuentes, C., 1990. Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Science* 149 (5), 292-300.

12. Horton, R., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. American Geophysical Union Transactions 14, 446–460.
13. Lamb, H. 1945. Hydrodynamics. Dover Publications.
14. Masuelli, S., Barrera D., 2010. Una extensión del modelo de Grenn-Ampt a condiciones de inundación de profundidad variable en llanuras, con solución explícita. Libro de Actas del 1er. Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, M. Varni, I. Extraigas y L. Vives (Eds), Tomo I: 287-293.
15. Philip, J., 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and albegraic infiltration equations. Soil Science 84 (3), 257–264.
16. Ravi, V., Williams, J. R. 1998. *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models* . Volume I. Technical Report no. Epa/600/r-97/128a . United States Environmental Protection Agency , National Risk Management Research Laboratory.
17. Richards, L, 1931. Capillary conduction of liquids through porous médiums. Physics, 1:318 333.
18. Russo, D. 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. Water Resour. Res., 24:453 459.
19. van Dam, J. C., Feddes, R. A., 2000. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. Journal of Hydrology 233, 72-85.
20. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a toda mi familia por el apoyo brindado durante todos estos años para poder terminar mis estudios, a mis amigos de la vida y aquellos nuevos amigos que he conocido a lo largo de la carrera. También quiero agradecer a todos los docentes de la FCAG, no solo por la formación que me dieron sino también por el continuo apoyo brindado durante todos estos años.

En particular, quiero agradecer a mi director de tesis de grado el Dr. Luis Guarracino por todo lo vivido durante este último año. No solo fue una gran fuente de conocimiento, sino también una fuente constante de consejos y apoyo en momentos críticos de la carrera.

Por último, quiero agradecer al jurado el Dr. Leonardo Monachesi y la Dra. Claudia Ravazolli por las correcciones, consejos y rápida devolución que hicieron del trabajo para poder recibirme a tiempo.